

乳化液喷雾与微爆现象的激光全息实验研究

盛宏至 张宏策 吴东垠 魏小林

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文采用离轴高速多脉冲红宝石激光全息摄影仪研究高温高压环境中乳化液喷雾的雾化和蒸发过程, 记录方式为象面全息方式, 再现时分别采用激光和白光光源。实验发现: 在适当的温度压力条件下, 乳化液喷雾可以发生微爆现象, 微爆呈团状, 又称“团状微爆”, 也称为“二次雾化”, 微爆能量可以将众多的小液滴及液滴碎片抛出液束区, 有效地改善液体与环境气体的混合过程, 具有重要的理论意义和实用价值。

关键词 激光全息摄影技术; 乳化液; 喷雾; 团状微爆

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)Suppl.-0213-04

THE LASER HOLOGRAPHIC STUDY OF SPRAY AND MICRO-EXPLOSION OF EMULSIONS

SHENG Hong-Zhi ZHANG Hong-Ce WU Dong-Yin WEI Xiao-Lin

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract Atomization and evaporation processes of emulsion sprays were observed with a multi-pulsed, off-axis, image-plane, ruby laser holocamera in a high temperature, high pressure combustion bomb. The laser and white light beams are employed in the reconstruction. The experimental results show that, the micro-explosion of emulsion sprays can happen in appropriate temperature and pressure conditions, and the micro-explosion appears to be group style, i.e., ‘the group micro-explosions’. The explosions eject droplet fragments from the spray region away, improving the fuel-air mixing process. The results are important to study in theory and applications.

Key words laser holocamera; emulsion' spray; group micro-explosion

1 引言

乳化液滴微爆现象的研究较多, 特别是实验内容比较丰富^[1~4], 在此基础上提出了各种乳化液滴的燃烧模型来分析乳化液滴燃烧微爆的机理, 研究微爆发生的极限条件、发生时刻等参数的计算方法, 并通过模拟计算研究温度、压力、掺水比、内相尺寸等诸多因素对微爆的影响。C. K. Law 就提出了一个简化乳化液滴燃烧模型^[5]。

但是, 单滴或多滴在液滴直径、滴间相互作用、背压、温度、传热条件和加热历程等方面与柴油机液雾燃烧的实际过程存在一定差距。在柴油机试验中, 由于发动机结构尺寸、乳化液掺水率及内相尺寸不同, 所得到的结果相差甚远, 难以评价并指导

乳化掺水技术的推广应用, 因而需要开展乳化液燃烧机理的研究。

由于检测手段等原因, 连接液滴与发动机试验之间的乳化液雾蒸发、微爆与燃烧的各环节研究并不深入, 而连接液滴燃烧与发动机试验之间的若干环节恰好是乳化液燃烧研究发展过程中所必须解决的关键性技术难题, 因此, 进行乳化液喷雾蒸发、微爆与燃烧过程的研究及发展相应的检测方法, 并指导发动机的应用实践是十分必要的。

2 试验装置和试验条件

本次试验设计一定容式燃烧弹装置模拟一般直喷式柴油机喷油瞬时的缸内压力和温度。设计的容弹可以产生高压(6.0 MPa)和高温(973 K)的条件。

收稿日期: 2004-02-20; 修订日期: 2004-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.19682010)

作者简介: 盛宏至(1951-), 男, 浙江杭州人, 博士, 研究员, 主要从事燃烧、雾化、多相流等研究。

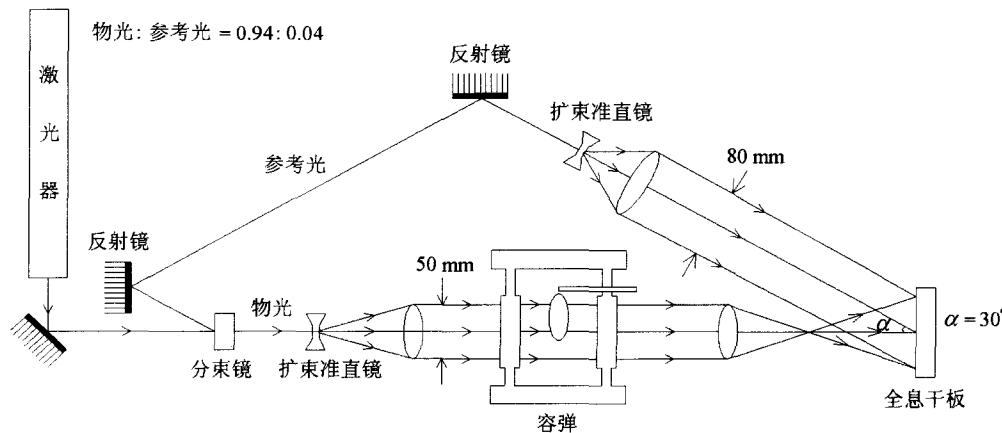


图1 全息光路图

为了保证乳化液在喷出喷油器之前的乳化特性，配备了水冷却系统，实验时容弹内充满氮气。

本文还设计了如图1所示的全息光路系统图，激光器内红宝石棒受高压氦灯的激励，释放出波长为 $0.6934\text{ }\mu\text{m}$ 的脉冲相干光，该激光器可连续输出四个脉冲，脉宽 30 ns ，脉冲间隔从 $5\text{ }\mu\text{s}$ 到 $100\text{ }\mu\text{s}$ 可调，单脉冲能量为 50 mJ ，具有良好的单模输出。红宝石脉冲激光经分束镜分成物光和参考光，分束物参比为 $0.96: 0.04$ ，物参角为 $30^\circ \sim 32^\circ$ ，物光经扩束与准直后成为直径 50 mm 的平行干涉光束，透过容弹上的石英窗，透过容弹内的喷雾，携带液雾信息的光束离开容弹后经过一正透镜放大，与经过扩束准直为 80 mm 左右直径的参考光束产生干涉现象，将信息记录在全息干版上，为离轴像(面)全息方式。像全息方式可以大大提高系统的信噪比和分辨率，可以录像面上 $1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 左右的微小颗粒，对于记录浓密油雾中的微小液滴十分有效。再现时，直接全息方式用一束He-Ne激光束再现，像面全息可以用白光再现，分别得到不同的信息。

3 试验结果及分析

作者进行了纯柴油和乳化液雾化和蒸发过程的对比试验，试验工质纯柴油为0号轻柴油，乳化液采用中国科学院力学研究所专利技术、由0号轻柴油和水经超声乳化方式配制而成，掺水比为12%，乳化剂系高效复合乳化剂，含量约为1%，内相水直径为 $2 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ ，系油包水型乳化液。喷油器为上海柴油机股份有限公司生产的150435系列压力雾化型喷嘴，喷嘴启喷压力为 17.3 MPa 。本文选了4幅乳化液和纯柴油喷雾在高温高压环境中的全息图

片，分析乳化液和纯柴油的雾化和蒸发过程。图2至图5分别为纯柴油喷雾的团状空气卷吸现象，乳化液喷雾蒸发过程中喷雾头部的像全息，乳化液喷雾侧面的团状微爆现象及纯柴油喷雾蒸发的像全息照片。经过大量的试验和分析比较，结合乳化油喷雾的阴影高速摄影(另文发表)，可以发现乳化液喷雾雾化和蒸发过程有如下特点：

(1) 喷雾侧面对空气的不断卷吸是以湍流微团的方式进行的，微团直径约为 $2 \sim 3\text{ mm}$ 。在微团内，液滴有可能具有相同的加热时间历程。

(2) 在燃烧弹内环境温度较高时喷射液体，运动的液滴迎风面处蒸汽层很薄，而背风面很厚，成为“彗星”状(参见图3)。该液滴形状有助于理解液滴内的流场。

(3) 柴油掺水乳化后，由于液体粘度增加等原因，雾化质量变差，液滴直径较大，而且大直径液滴较多^[6]；因此，乳化液滴蒸发时有较长的加热过程，蒸发时间长，一般可达 $8 \sim 10\text{ }\mu\text{s}$ 。此时，大直径乳化液滴的贯穿速度也较大，飞在大批液滴的前面。

(4) 乳化液滴的“团状微爆”有较高的能量，能够将液滴碎片和小液滴射出喷雾边缘 $5 \sim 7\text{ mm}$ 以上，扩大了喷雾的锥角，并使雾注边缘不光滑。而图5所示的纯柴油全息照片则无上述现象，雾注的边缘是光滑的。

(5) 环境压力变化对微爆是否发生没有显著影响，但造成气体密度变化，使微爆的影响区域变化。温度升高使微爆发生时刻提前，强度变弱。可以推测：存在一个最佳的“微爆温度”范围。

(6) 喷油器的启喷压力对微爆是否发生和微爆强度没有明显影响。

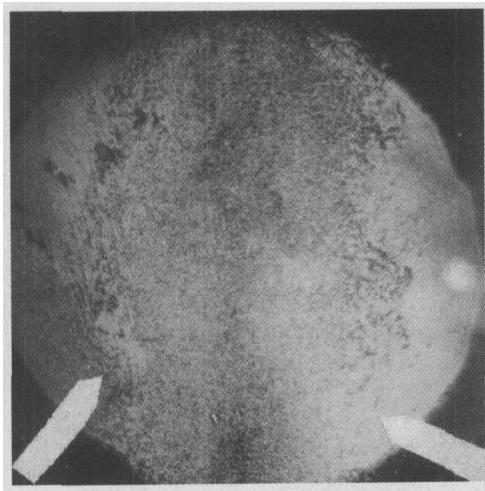


图2 喷雾的团状卷吸现象
(3.2 MPa, 753 K)

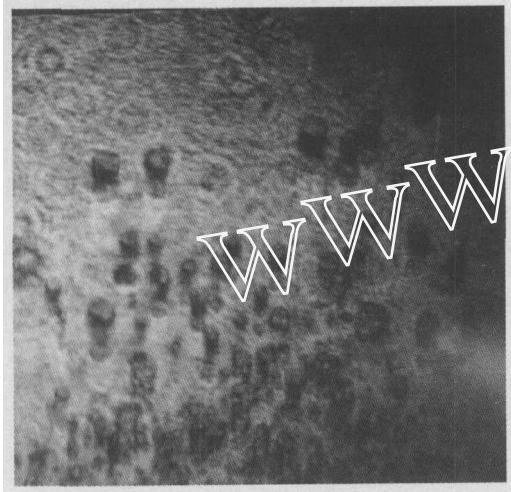


图3 乳化液喷雾头部蒸发的像全息
(3.2 MPa, 733 K)

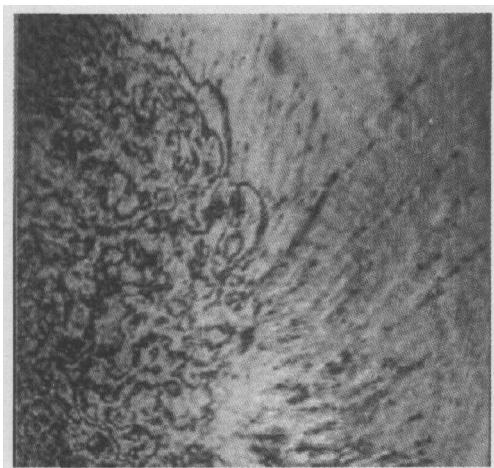


图4 乳化液喷雾侧面的团状微爆
(3.2 MPa, 773 K)

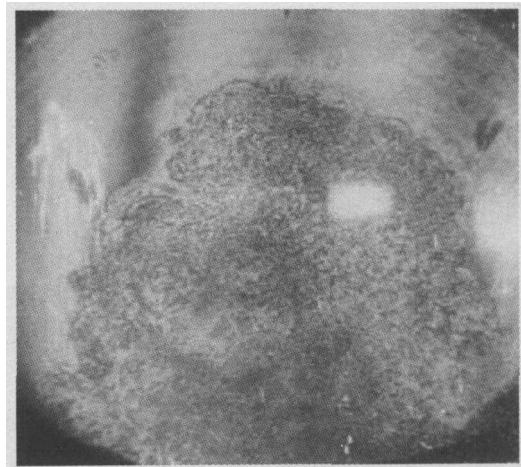


图5 纯柴油喷雾的像全息图
(3.2 MPa, 733 K)

4 微爆现象的分析

当环境气体温度和压力合适时, 滴内水就可能在蒸发前被迅速加热成为过热水, 过热水处于亚稳定过热态, 当有外界扰动时, 就可能瞬间全部气化, 体积急剧膨胀。与此同时, 这个扰动迅速传播开来, 使滴内其它水滴也随之瞬间汽化, 撕碎连续相, 形成微爆。当环境气体温度过高, 液滴界面换热过于强烈, 在滴内形成很陡的温度梯度, 当外层水达到过热极限时, 内层水可能没有处于过热态, 只有部分水参与微爆, 虽然微爆出现时间较早, 但强度却较弱。可以推测, 对于处于一定外界条件和滴径的乳化液滴, 存在着最佳的“微爆温度”范围。

其次, 在液滴刚喷入热气流中最初的一段加热过程中, 液滴内可能在气流剪切作用下滴内回流—希尔涡, 在液滴表面附近形成“无水层”^[7~9], 层内水点已在加热过程中迅速蒸发完毕。“无水层”的存在对乳化液滴发生微爆有重要意义。“无水层”的厚度与内相水滴的尺度相近。乳化油滴尺寸小, 则除去“无水层”后, 乳化液滴核心的水含量很少, 产生微爆的能量就少。这也说明为什么雾化性能不好的老式柴油机使用乳化油后得到较大的性能改善。

在喷雾形成过程中, 液束不断卷吸空气并扩张, 形成较多湍流微团, 一个湍流微团包括许多小液滴, 每个微团内的小液滴具有相近的液滴直径和相似的加热历程, 因而当湍流微团内的某个液滴发生微爆, 爆炸波及液滴碎片会诱发微团内其它液滴随之发生微爆, 造成雪崩反应, 形成“团状微爆”, 微爆常常以2~3 mm 直径的团状爆炸出现, 具有足够的能量将液滴碎片及相邻的小液滴射出若干毫米, 扩大喷雾锥角, 改善液体与环境气体之间的宏观和微观混合, 改进液体燃料的燃烧过程。

5 结 论

激光全息摄影技术是研究乳化液喷雾雾化与蒸发过程的有效手段。只要选择适当的记录与再现方式, 可以得到其它方法难以获取的微观过程的信息, 证实乳化液喷雾微爆现象的存在。

乳化液喷雾只要在合适的温度和压力环境中, 就会发生较强烈的“微爆”现象, 微爆呈团状(故称“团状微爆”), 可以改善液体与环境气体的宏观混合和微观混合。

“微爆”现象是由于液滴内的若干微小水滴在快速加热过程中形成不稳定的过热水并急剧气化, 撕碎液滴而形成的, 其“无水层”现象可能对微爆的发生起重要作用, 有关“无水层”生成机理及存在条件等内容还需进行深入的基础性研究。

从试验结果可以看出存在最佳“微爆温度”, 环境温度过高和过低均可能降低微爆能量, 甚至不会发生微爆现象。

参 考 文 献

- [1] Wang C H, Law C K. Microexplosion of Fuel Droplets Under High Pressure. *Combustion and Flame*, 1985, 59(1): 53-62
- [2] Tsue Mitsuhiro, Yamasaki Hiroshi, Kadota Toshikazu. Effect of Gravity on Onset of Microexplosion for an Oil-in-Water Emulsion droplet. In: *Proceedings of 27th Symposium (International) on Combustion*, Boulder, CO. USA, 1998. 2587-2593
- [3] Marrone N J, Kennedy I M, Dryer F L. Internal Phase Size Effects on Combustion of Emulsions. *Combustion Science and Technology*, 1983, 33: 299-307
- [4] Rene Ocampo-barrera, Bafael Villasenor, Antonio Diego-Marin. An Experimental Study of the Effect of Water Content on Combustion of Heavy Fuel Oil/Water Emulsion Droplets. *Combust. Flame*, 2001, 126: 1845-1855
- [5] Law C K. A Model for the Combustion of Oil/Water Emulsion Droplets. *Combustion Science and Technology*, 1977, 17: 29-38
- [6] 盛宏至, 吴东垠, 张宏策. 三组元乳化液雾化特性的研究. *工程热物理学报*, 2003, 24(5): 885-887
- [7] Sheng H Z, Chen L. Experimental Investigation on Atomization and Evaporation of Droplets in Spray by Ruby Laser Off-Axis Holography. In: *The Proc. of 4th ICCLASS*, The Fuel Society of Japan. Sendai, Japan, 1983. 391-396
- [8] Sheng H Z, Chen L, Zhang Z P, et al. The Droplet Group Microexplosions in Water-in-Oil Emulsion Sprays and Their Effects on Diesel Engine Combustion. In: *Proceedings of 25th Symposium (International) on Combustion*. Irvine, CA, USA, 1994. 175-181
- [9] Sheng H Z, Chen L, Wu C K. The Droplet Group Micro-Explosions in Water-in-Oil Diesel Fuel Emulsion Sprays. *SAE Trans., Journal of Engine*, SAE Trans., 950855